

基于 TCD 的锚拉板疲劳性能分析与试验研究

王会利^{*1}, 张岩^{1,2}, 秦泗凤³

- (1. 大连理工大学 桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116024;
2. 上海林同炎李国豪土建工程咨询有限公司, 上海 200092;
3. 大连大学 材料破坏力学数值试验研究中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 锚拉板广泛用于钢箱梁斜拉桥中, 但锚拉板与锚管连接的倒圆角处存在应力集中, 在动力荷载作用下容易发生疲劳破坏. 以大连某斜拉桥为工程背景, 对其锚拉板疲劳性能展开理论分析与试验研究. 首先通过临界距离理论(theory of critical distance, TCD)对锚拉板的疲劳性能进行理论分析, 通过“线法”得到锚拉板等效应力为 141 MPa. 然后进行疲劳试验, 试验模型比例为 1:1.5. 由试验测得锚拉板的最大等效应力 32 MPa, 最大变形 3 mm, 锚拉板在施加荷载过程中处于弹性工作状态. 在 200 万次的疲劳加载后未发现裂纹. 理论分析和疲劳试验结果表明, 该斜拉桥锚拉板式索梁锚固结构在设计寿命期内, 不会发生疲劳开裂.

关键词: 临界距离理论(TCD); 锚拉板; 数值分析; 疲劳试验

中图分类号: TU311; P315.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201806008

0 引言

随着斜拉桥的跨度不断提高, 斜拉桥所受的索力也在逐渐增大, 当巨大的索力作用在斜拉桥上, 斜拉索的锚固结构将受到很大的挑战. 特别地, 当巨大的索力反复变化时, 索力产生的巨大应力可能会使斜拉索锚固结构的应力集中部分产生疲劳破坏, 故斜拉桥的索梁锚固结构是受力的关键位置. 索梁锚固结构在荷载的反复作用下, 连接处、应力集中处均易产生疲劳破坏. 尤其是锚拉板, 由于其直接把索力传到钢箱梁上, 在锚拉板应力集中处疲劳问题更为严重, 研究在运营期间锚拉板的抗疲劳性能具有重要意义. 目前, 国内外的钢桥疲劳规范中的疲劳设计仅适用于具有简单连接细节的结构, 对于复杂的受力结构却不适用^[1]. 近年来, 有关人员通过进行一系列的疲劳试验来评估钢结构的疲劳性能. Li 等^[2]通过对广州东沙桥索梁锚固结构进行疲劳试验, 研究锚拉板厚度、锚拉板与锚管之间角焊缝半径对锚拉板应力分布的影响, 验证设计的合理性. Wei 等^[3]通过建立锚拉板有限元模型和足尺模型试验研究锚拉板

的力学行为, 得到锚拉板的应力分布和应力结果, 最终证实锚拉板设计可靠. Wang 等^[4]通过静力分析和试验研究, 对每个应力工况下的应力进行分析和监测, 发现在最大索力作用下, 锚固装置总是呈现出线弹性行为.

本文以大连南部滨海大道西延伸线工程斜拉桥为背景, 分析锚拉板的疲劳性能. 首先建立全桥分析模型, 获得全桥模型在疲劳荷载作用下最不利索力部位以及等效索力幅; 其次建立锚拉板分析模型, 基于 Taylor 临界距离理论(theory of critical distance, TCD)进行锚拉板的疲劳性能分析; 结合数值分析结果, 以及试验模型尺寸和试验要求, 设计疲劳试验方案, 进行常幅疲劳荷载作用下的疲劳试验研究.

1 临界距离理论(TCD)

1.1 疲劳失效

疲劳失效是内部原因和外部原因共同作用下发生的. 内部原因包括内部缺陷和不合理的设计^[5]; 外部原因包括外加应力. 通常外加应力作用

收稿日期: 2018-04-09; 修回日期: 2018-09-26.

基金项目: 辽宁省博士科研启动基金资助项目(20170520138); 辽宁省教育厅科学研究项目(L2014027); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT15QY34).

作者简介: 王会利*(1979-), 男, 博士, 副教授, E-mail: whl7997@163.com.

下疲劳极限之内结构不会出现疲劳损伤, 这样可把疲劳极限作为产生疲劳失效的临界值. 应力超过疲劳极限会在一定范围内造成疲劳损伤, 微观原因为金属晶粒的滑移, 这个范围域通常用一个圆形代表, 圆形的直径为损伤区的特征长度, 与缺口的形状无关, 如图 1 所示, 3 种试样的特征长度相同^[6], 而特征长度可用下式计算:

$$L_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma_0} \right)^2 \quad (1)$$

式中: L_0 为临界距离 (m), ΔK_{th} 为材料疲劳裂纹扩展的应力强度因子门限值 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), $\Delta \sigma_0$ 为材料的疲劳极限 (MPa).

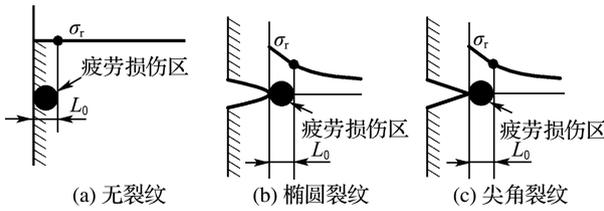


图 1 疲劳损伤区

Fig. 1 Fatigue damage area

1.2 TCD 分析

构件的疲劳寿命会使得结构的安全受到影响. 主要有 3 种方法可以预测疲劳寿命: 一是以 S-N 曲线和 Miner 线性累积损伤理论为基础的传统预测方法; 二是以线弹性断裂力学 (LEFM) 为基础的预测方法; 三是其他方法, 包括热点应力法 (hot spot stress method)、有效缺口应力法 (notch stress method) 和 TCD^[7-9], 这些方法是最近发展起来的, 能够解决名义应力法无法解决的复杂局部问题, 其中 Taylor 提出的 TCD, 方便实用, 应用广泛, 物理意义明确.

近年来, TCD 多用于评估金属结构的疲劳寿命和疲劳性能. Taylor 利用 TCD 来预测具有不同裂纹扩展机制的 3 种不同模型材料的凹口断裂行为^[10]. Sun 等^[11]首先利用外推法来计算应力集中区的应力梯度, 并间接地使用 TCD 来获得材料参数. 叶华文等^[12]利用 TCD 判断钢丝在服役期间的腐蚀疲劳性能, 根据腐蚀坑局部应力求出的临界距离结合有限元模型计算腐蚀疲劳寿命. 孙迪等^[13]引入 TCD 并建立了缺口根部的应力幅函数来建立缺口试件疲劳强度尺寸系数计算公式. 辛朋朋等^[14]为了研究缺口临界距离与疲劳寿命、荷载比、应力集中系数之间的关系以及对疲劳

寿命的影响, 对 TC4 合金缺口试样进行分析与研究. 黄佳等^[15]利用热点应力法和 TCD 对 DZ125 进行低循环疲劳寿命分析.

图 2 显示了 TCD 的基本内涵, 如果缺口根部出现裂纹, 根据疲劳失效定论可知, 在裂纹根部一定距离 ($L_0/2$) 处的应力为材料的疲劳极限 $\Delta \sigma_0$, 疲劳荷载和静载作用下应力大小是相同的, 因此疲劳失效分析可以转化为静载失效分析.

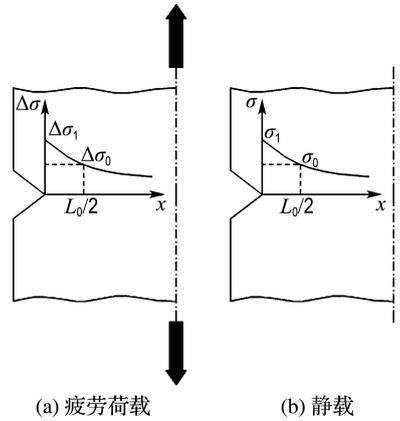


图 2 TCD 示意图

Fig. 2 TCD schematic

TCD 即是当距离应力集中根部 $L_0/2$ 处或 $2L_0$ 路径上的平均应力等于材料的疲劳极限时, 将发生疲劳失效. 利用点法 (PM) ($x = L_0/2$) 判断时, 当该点的应力等于疲劳极限 $\Delta \sigma_0$, 此时将发生疲劳失效, 失效准则可表示为

$$\Delta \sigma_{(x=L_0/2)} = \Delta \sigma_0 \quad (2)$$

而线法 (LM) ($x = 2L_0$) 可表示为

$$\frac{1}{2L_0} \int_0^{2L_0} \Delta \sigma(x) dx = \Delta \sigma_0 \quad (3)$$

如图 3 所示, $\Delta \sigma(x)$ 为距离应力集中根部处 x 的函数.

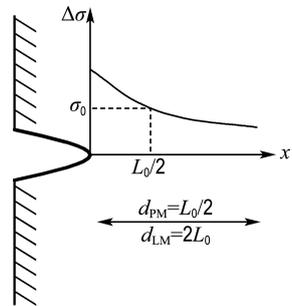


图 3 点法与线法示意图

Fig. 3 Point method and line method schematics

2 工程实例

大连南部滨海大道西延伸线工程斜拉桥全长 408 m, 桥宽 29.5 m, 跨径布置 50 m + 96 m + 192 m + 70 m. 桥型布置图如图 4 所示. 本桥采用的斜拉桥为双塔单索面, 主梁为正交异性桥面板钢箱梁, 中心梁高 3.0 m, 底板宽度 22.83 m, 311~369 号斜拉索如图 4(a) 所示.

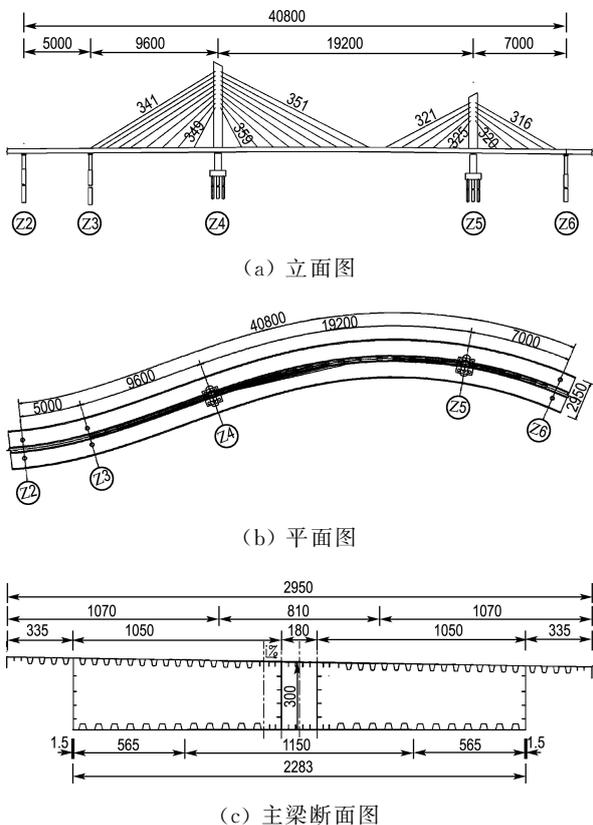


图 4 桥型布置图(单位:cm)

Fig. 4 Bridge layout diagram (unit: cm)

2.1 疲劳荷载

根据中国《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[16] 中有关疲劳荷载的规定, 疲劳荷载计算模型 I 使用等效车道荷载. 所得南部滨海大道斜拉桥索力幅如图 5 所示, 其中边跨的边索, 即 316 号斜拉索的索力幅最大, 为 430 kN.

根据应力相等原则, 锚拉板模型的应力应与实桥一致, 模型实际加载幅值可由下式计算:

$$F_m = C_1^2 F_p \quad (4)$$

式中: F_m 为作用在模型上的荷载; F_p 为原型所受荷载; C_1 为模型与原型的几何相似比, 根据试验条件相似比取为 2/3. 因此, 作用在模型上的荷载

幅值为 $430/1.5^2 \text{ kN} = 191 \text{ kN}$, 故将最终的幅值取为 200 kN.

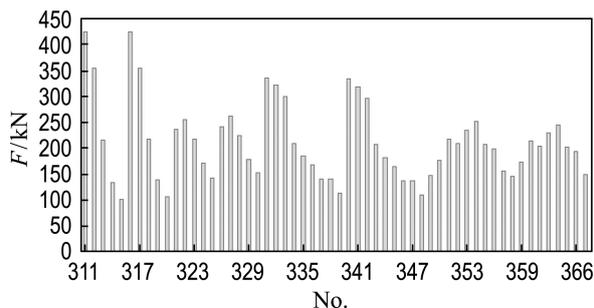


图 5 南部滨海大道斜拉桥索力幅

Fig. 5 The cable force amplitude of cable-stayed bridge on South Binhai Avenue

2.2 锚拉板疲劳强度理论预测

利用 ANSYS 有限元分析软件, 选用二维八节点板单元 PLANE183, 采用四边形四节点等参元和三角形等参元共同划分网格. 板厚 0.04 m, 网格基础尺寸为 0.03~0.05 m, 为了能够精确地得到应力集中部位的平均应力, 本文将该区域的网格进行精细划分, 尺寸为 0.3 mm, 共有 3 694 个节点, 划分 1 137 个单元. 在锚拉板底部施加固定约束, 沿着锚拉板与锚管相连的地方施加 X 向和 Y 向荷载, X 向荷载大小为 2 874.6 kN, Y 向荷载大小为 1 417.6 kN. 静力加载的等效应力分布如图 6 所示. 结果显示, 锚拉板与锚管连接的倒圆角处存在应力集中, 等效应力最大值为 129 MPa, 在应力集中点附近定义应力积分路径 P. 等效应力沿 P 的变化如图 7 所示. 由图 7 可知: 应力随着距离的增大有较大变化, 可对图 7 中的曲线进行拟合, 引入基于有限元线弹性分析的多项式作为等效应力函数^[13], 对等效应力沿 P 的变化进行拟合, 如式(5)所示. 该式可以精确地描述应力集中附近的等效应力. 本文利用“线法”取 $0 \sim 2L_0$ 路径上的平均应力表征当量应力, 其中 $L_0 = 0.3 \text{ mm}$ ^[7]. 利用式(3)可得等效应力为 141 MPa. 与试件的疲劳极限 420 MPa^[7] 比较相差较大, 因此不会产生疲劳破坏.

$$y = A + B_1 x + B_2 x^2 + B_3 x^3 \quad (5)$$

式中: x 为到应力集中点的距离; 由有限元所得离散点的结果拟合得出, $A = 1.46 \times 10^8$, $B_1 = -1.44 \times 10^8$, $B_2 = 1.41 \times 10^8$, $B_3 = -2.93 \times 10^7$.

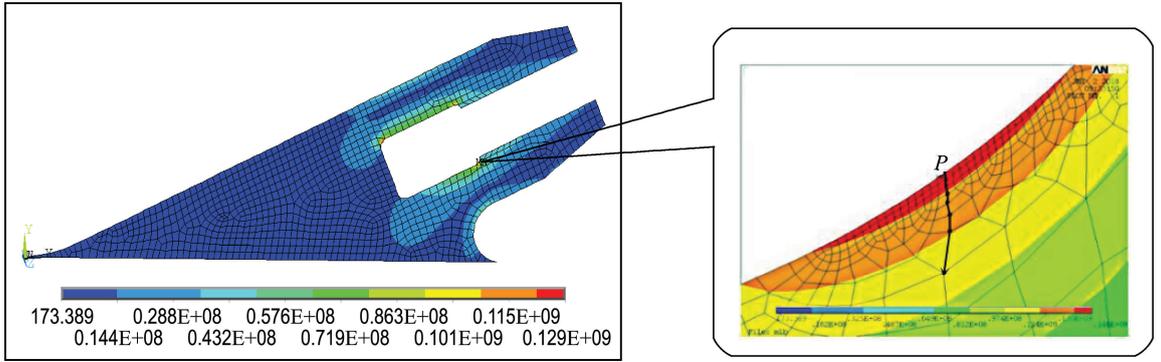


图 6 等效应力图(单位:Pa)

Fig. 6 Equivalent stress map (unit: Pa)

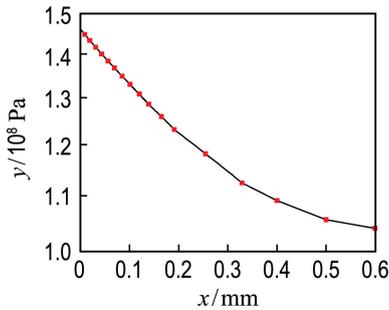


图 7 应力积分路径 P 上的应力分布

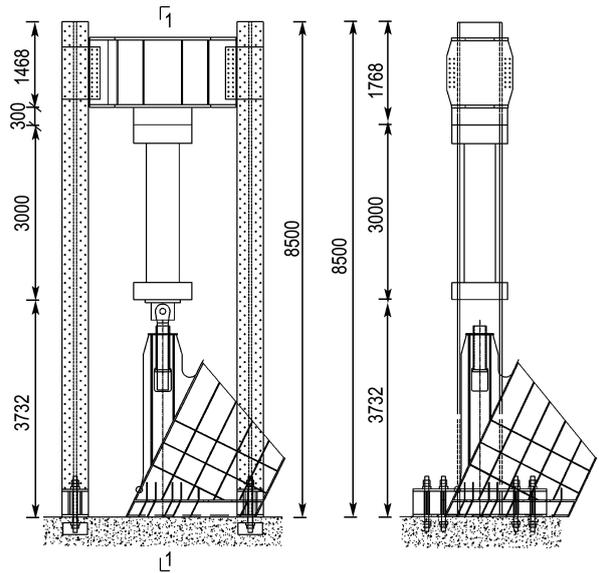
Fig. 7 Stress distribution on integral path P

3 疲劳模型设计

3.1 试验模型设计

最终选取 316 号斜拉索对应梁上的锚拉板作为试验原型. 根据试验空间的尺寸及试验机能力, 试验模型需根据模型相似原理选取钢箱梁局部, 为保证模型的正确性需对选取的模型进行理论计算. 本试验采用 1 : 1.5 的缩尺模型. 为了确保顶部和腹板的行为不受边界条件影响以及使试验模型最大可能地反映实际结构的受力特性, 试验模型制作材料采用与实桥相同的 Q345qD. 按圣维南原理及加载需要, 最终的试验模型确定为长 2.9 m, 宽 1.6 m, 高 3.0 m, 中腹板厚 17 mm. 锚拉板与桥面板、锚拉板与加劲肋均使用与实桥一样的连接方式. 同时为了方便疲劳荷载的施加, 将钢箱梁倾斜放置, 使得斜拉索受力方向竖直向上. 通过锚固螺栓将模型支撑在地面上, 并且作动器与锚管通过螺栓连接来施加荷载. 试验模型及加载装置如图 8 所示.

钢材为 Q345qD, 尺寸名称及厚度见表 1. 试验采用 1 000 kN 微机控制电液伺服结构疲劳试验机进行疲劳加载.



(a) 试验装置立面图

(b) 1-1 剖面图

图 8 疲劳试验模型(单位:mm)

Fig. 8 Fatigue experiment model (unit: mm)

表 1 尺寸名称及厚度

Tab. 1 Size name and thickness

名称	厚度/mm
锚拉板	40.0
桥面板	22.0
锚管	17.5
锚垫板	33.0
加劲肋	24.0

3.2 测点布置与加载方案

本试验主要关注锚拉板应力集中处及焊缝处的应力情况, 使用电测法对应变进行测量. 锚拉板受力复杂, 全部测点需要布置应变花, 共布置 39 个应变花. 锚拉板试验模型采用 ANSYS 进行数值模拟分析, 并基于 ANSYS 的模拟结果确定测

点的位置张贴应变花. 测点布置和测点编号如图9所示.

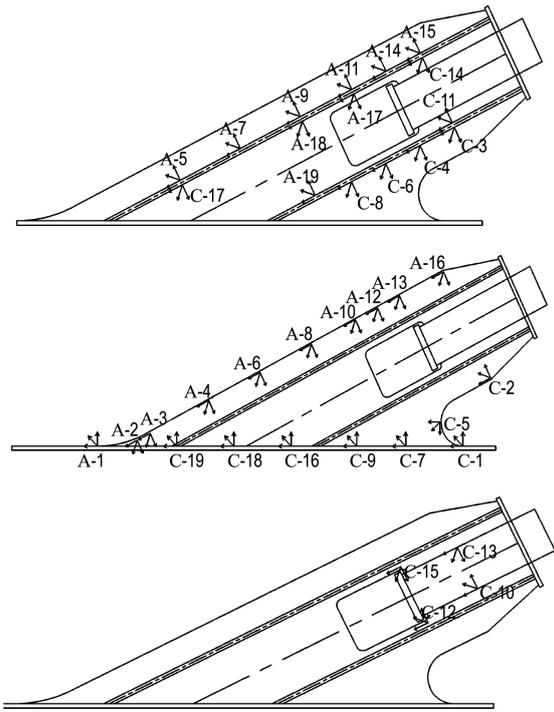


图9 应变花布置示意图

Fig. 9 Strain flower layout schematic

不论是汽车荷载还是铁路荷载,规定在特定荷载作用下,都可以承受200万次的循环加载,相当于120 a的设计基准期内每天的疲劳加载次数不少于45次^[17].因为荷载幅值为200 kN,按照实际桥梁受力情况,确定锚拉板疲劳下峰值为50 kN,上峰值为250 kN.加载方式为0—50 kN—100 kN—150 kN—200 kN—250 kN,卸载方式为250 kN—200 kN—150 kN—100 kN—50 kN—0,通过疲劳结构系统对试验模型直接施加常幅疲劳荷载,加载频率为1.5 Hz.

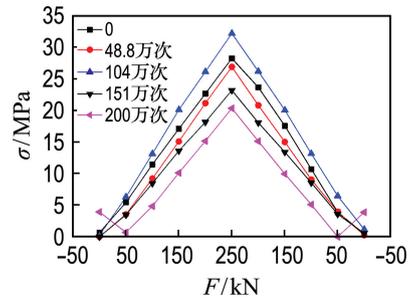
在试验的过程中需要实时对试验模型的疲劳关键部位进行观察,包括动态测试和约每50万次的分级静载测试.当应力加载到0、50万次、100万次、150万次、200万次停机后,对模型进行静力加载,静力加载稳定至少5 min以上再进行读数测量.疲劳试验加载如图10所示. C-12和C-15为锚拉板与锚管连接处的测点,测点的应力测试结果见图11. 竖向各级荷载下的竖向位移值见图12.

通过图11可以看出,测点应力值与静力加载的关系曲线呈上升规律,表明每隔50万次疲劳加

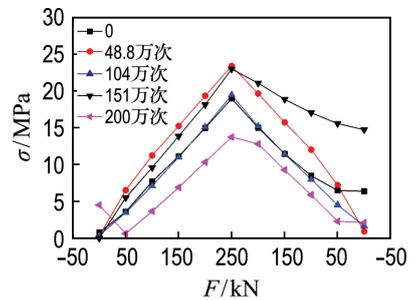


图10 锚拉板疲劳试验

Fig. 10 Anchor plate fatigue test



(a) 测点 C-15



(b) 测点 C-12

图11 测点等效应力曲线

Fig. 11 Equivalent stress curve of measuring point

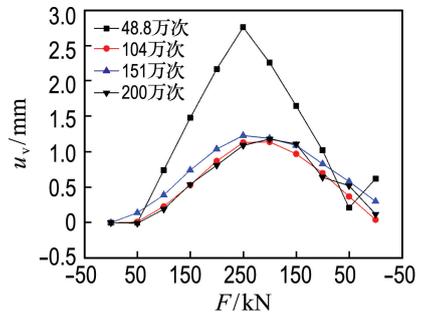


图12 各级荷载下的竖向位移值

Fig. 12 Vertical displacement values at various loads

载,各测点的应力值波动不大,说明在整个疲劳试验过程中,锚拉板的应力状态稳定.在所有测点

中,C-15 测点应力值最大,为 32 MPa;C-12 测点应力值为 24 MPa。从图 12 可看出,4 次总变形相近,说明锚拉板在加载过程中能够处于弹性工作状态,并未发生较大的变形及疲劳破坏。同时,在整个疲劳加载过程中每隔 50 万次对模型进行表面观察,均没有发现试件有异常现象。

3.3 疲劳试验结果分析

本文对大连南部滨海大道西延伸线工程斜拉桥锚拉板进行了静力分析和试验研究,在设计荷载幅作用下,锚固装置总是呈现线弹性行为,所有应力均小于屈服应力,试件未发生疲劳破坏,与上节基于 TCD 得到的锚拉板疲劳性能相同。

在疲劳荷载作用下,有限元分析得到测点 C-15 的最大等效应力是 129 MPa,和试验测试得到的最大应力 32 MPa 比较相距较大。很显然,有限元提供了锚拉板试验峰值应力的保守估计。此外,有限元分析和试验研究的应变趋势基本是一致的,有限元分析为应变分布试验研究提供了很好的基础。产生较大差异可能是由于在试验过程中发生的以下原因引起的:

(1)应变花定位误差。在实际贴片过程中,定位会与有限元模型有一定差别,会给试验值造成误差。比如,在应力集中的几个区域,由于这几个区域太狭窄,对应变片布置造成了一定的困难。

(2)边界条件。在有限元模型中确定边界条件为固结,而在实际试验过程中由于构件和地面之间存在的空隙具有一定的简支效果,造成边界条件不同。

(3)仪器误差。采集仪器误差或者是应变花毁损都会造成试验值和理论值的误差。

4 结 论

(1)利用 TCD 中的“线法”得到最大应力 141 MPa,小于疲劳极限 420 MPa,锚拉板设计合理。

(2)由试验测得锚拉板的最大等效应力为 32 MPa,最大变形为 3 mm,但始终处于弹性工作状态,锚拉板在施加荷载过程中也处于弹性工作状态。经过 200 万次的疲劳加载无裂纹产生,没有发生疲劳破坏。

(3)该斜拉桥锚拉板式索梁锚固结构在设计寿命期内,不会发生疲劳开裂。

参考文献:

[1] LOPEZ-JAUREGI A, ESNAOLA J A, ULACIA

I, *et al.* Fatigue analysis of multipass welded joints considering residual stresses [J]. **International Journal of Fatigue**, 2015, **79**:75-85.

[2] LI Cuijuan, REN Weiping, WEI Xing, *et al.* Full scale model test on tensile anchor plates in cable-girder anchorage of Guangzhou Dongsha Bridge [C] // **Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Engineering, ICTE 2009**. Chengdu: ASCE, 2009.

[3] WEI Xing, XIAO Lin, WANG Zijian. Full-scale specimen testing and parametric studies on tensile-plate cable-girder anchorages in cable-stayed bridges with steel girders [J]. **Journal of Bridge Engineering**, 2018, **23**(4):04018006.

[4] WANG Yingliang, WANG Zijian, WEI Xing, *et al.* Test and finite element analysis of gusset plate anchorage for cable-stayed bridges [J]. **Stahlbau**, 2013, **82**(4):313-321.

[5] 黄宁. 大型结构件的疲劳寿命预测方法研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
HUANG Ning. Research on fatigue life prediction methods for large-scale components [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)

[6] EL HADDAD M H, SMITH K N, TOPPER T H. Fatigue crack propagation of short cracks [J]. **American Society of Mechanical Engineers (Paper)**, 1978(78):1978090001247.

[7] TAYLOR D. **The Theory of Critical Distances: A New Perspective in Fracture Mechanics** [M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.

[8] RIGHINIOTIS T D, IMAM B M, CHRYSSANTHOPOULOS M K. Fatigue analysis of riveted railway bridge connections using the theory of critical distances [J]. **Engineering Structures**, 2008, **30**(10):2707-2715.

[9] TAYLOR D, WANG G. The validation of some methods of notch fatigue analysis [J]. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, 2000, **23**(5):387-394.

[10] TAYLOR D. The theory of critical distances: A link to micromechanisms [J]. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 2017, **90**:228-233.

[11] SUN Songsong, YU Xiaoli, CHEN Xiaoping. Study of component structural equivalent fatigue based on a combined stress gradient approach and the theory of critical distance [J]. **Engineering Failure Analysis**, 2016, **60**:199-208.

- [12] 叶华文, 黄云, 王义强, 等. 基于临界域法的桥梁钢丝腐蚀疲劳寿命[J]. 西南交通大学学报, 2015, **50**(2):294-299.
YE Huawen, HUANG Yun, WANG Yiqiang, *et al.* Fatigue life estimation of corroded bridge wires based on theory of critical distances [J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2015, **50**(2):294-299. (in Chinese)
- [13] 孙迪, 胡振东. 基于TCD理论的缺口试样疲劳强度尺寸系数计算[J]. 力学季刊, 2015, **36**(2):288-295.
SUN Di, HU Zhendong. Research of the size factor of fatigue strength based on TCD theory [J]. **Chinese Quarterly of Mechanics**, 2015, **36**(2):288-295. (in Chinese)
- [14] 辛朋朋, 胡绪腾, 宋迎东. 基于临界距离理论的TC4合金缺口试样低循环疲劳寿命预测[J]. 航空动力学报, 2012, **27**(5):1105-1112.
XIN Pengpeng, HU Xuteng, SONG Yingdong. LCF life prediction for TC4 alloy notched specimens based on theory of critical distance [J]. **Journal of Aerospace Power**, 2012, **27**(5):1105-1112. (in Chinese)
- [15] 黄佳, 杨晓光, 石多奇, 等. 基于临界距离-临界平面方法预测DZ125缺口低循环疲劳寿命[J]. 机械工程学报, 2013, **49**(22):109-115.
HUANG Jia, YANG Xiaoguang, SHI Duoqi, *et al.* Low cycle fatigue life prediction of notched DZ125 component based on combined critical distance-critical plane approach [J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2013, **49**(22):109-115. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Steel Bridge: JTG D64-2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [17] 李乔, 唐亮, 裴岷山, 等. 大跨径公路钢斜拉桥索梁锚固区疲劳试验荷载研究[J]. 公路, 2004(12):7-10.
LI Qiao, TANG Liang, PEI Minshan, *et al.* A study on fatigue test loads of cable-girder anchorage zone of steel cable stayed highway bridge [J]. **Highway**, 2004(12):7-10. (in Chinese)

Analysis and experimental research on fatigue performance of anchor plate based on TCD

WANG Huili^{*1}, ZHANG Yan^{1,2}, QIN Sifeng³

(1. Institute of Bridge Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Shanghai Lin Tongyan Li Guohao Civil Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai 200092, China;

3. Materials Fracture Mechanics Research Center for Numerical Test, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: Anchor plate is widely used in steel box girder cable-stayed bridges, however there is a stress concentration at the connection between the anchor plate and the anchor pipe, which is prone to fatigue failure under dynamic load. Taking a cable-stayed bridge in Dalian as engineering background, the theoretical analysis and experimental research on the fatigue performance of its anchor plate are introduced. First of all, the fatigue performance of the anchor plate is analyzed with the theory of critical distance (TCD). The equivalent stress of the anchor plate is 141 MPa by "linear method". Next a fatigue experiment is performed, whose model ratio is 1 : 1.5. The maximum equivalent stress of the anchor plate is 32 MPa and the maximum deformation is 3 mm from experiment. The anchor plate is in elastic working state during the loading process. After 2 million times fatigue loading, there are no cracks on the specimen. The theoretical analysis and fatigue experiment results show that the cable-stayed anchor plate will not undergo fatigue cracking during the design life.

Key words: theory of critical distance (TCD); anchor plate; numerical analysis; fatigue test